

# Schutz flussnaher Trinkwasserfassungen bei Flussraum-Aufweitungen in voralpinen Schotterebenen

Eduard Hoehn · Benjamin Meylan

Eingang des überarbeiteten Beitrages: 5. 5. 2009 / Online veröffentlicht: 25. 6. 2009  
© Springer-Verlag 2009

**Kurzfassung** In den meisten alpinen und voralpinen Schotterebenen bestehen Wechselwirkungen zwischen Flüssen und Grundwasser. Viele Trinkwasserversorger nutzten dies, indem sie ihre Fassungen in Flussnähe bauten. Neuerdings hat sich im Flussbau die Einsicht durchgesetzt, Hochwasserschutzmaßnahmen mit einer Aufwertung bzw. Aufweitung des Flussraums zu koppeln. Dadurch können diese flussnahen Fassungen gefährdet werden. Meist verringert sich durch Arbeiten im Flussraum die Verweildauer des Grundwassers, und der Anteil an flussnahe Infiltrat in der Fassung erhöht sich. Hochwasserereignisse können zusätzlich zu Durchbrüchen von flussnahe Infiltrat führen, was besonders bei hoher Belastung des Flusses durch Abwasser mit einer Grundwasserunreinigung einhergeht. Wo Flussraum-Aufweitungen unumgänglich sind, müssen Maßnahmen getroffen werden, um wichtige Trinkwasserfassungen vor Verunreinigung zu schützen. Drei Fälle mit unterschiedlichem Risiko werden diskutiert: i) geringes Risiko bei fehlenden Wechselwirkungen oder bei Exfiltration, ii) Risiko bei Infiltration, während oder nach geplanten Aufweitungen, und iii) hohes Risiko bei problembehafteten Fassungen. Bei Infiltration über eine mächtige ungesättigte Zone zwischen Fluss und Fassung ist das Risiko geringer als bei Infiltration mit direktem hydraulischem Anschluss des Flusses ans Grundwasser. Für Fassungen mit Risiko bei Flussraum-Aufweitungen wer-

den technische Maßnahmen zur Minderung des Gefahrenbildes vorgeschlagen.

## Measures to protect drinking-water wells near rivers from hydraulic engineering operations in peri-alpine flood-plains

**Abstract** In alpine and peri-alpine flood plains, rivers can lose water to the ground water (infiltrating conditions), or gain water from it (exfiltrating conditions). Since sediments within these flood plains are highly permeable, drinking water wells near infiltrating rivers are often highly efficient. To reduce flood risks, engineers couple hydraulic flood protection measures with an enhancement of lateral connectivity. Eventually, the residence time of the infiltrating ground water is reduced and the fraction of infiltrated water rises. Floods lead to the breakthrough of freshly infiltrated water. This can lead to groundwater contamination, if the river is loaded with wastewater. Where measures of hydraulic engineering are necessary, drinking-water wells must therefore be protected from contamination. We discuss three cases of contamination risk: i) low risk under exfiltrating conditions or where river and ground water interaction is weak, ii) increased risk during or after hydraulic operations under infiltration conditions; and iii) generally high risk at wells with low residence times and high fractions of infiltration water. We suggest that the risk is reduced when a thick unsaturated zone separates the river from the well ( $> 10\text{ m}$ ), compared to direct water loss through saturated media. For wells at risk, we propose technical protection measures to reduce the danger.

**Keywords** flood plain · losing river · lateral connectivity · land-use conflict · residence time · mixing · drinking-water supply

Eduard Hoehn (✉)  
Eawag, Wasserforschungs-Institut des ETH-Bereichs,  
8600 Dübendorf, Schweiz  
E-Mail: hoehn@eawag.ch

Benjamin Meylan,  
BAFU, Bundesamt für Umwelt, Sektion Grundwasserschutz,  
3003 Bern, Schweiz

## Einleitung

In Gebieten mit regem Wasseraustausch zwischen Fluss und Grundwasser entstehen ökologisch wertvolle Auenlandschaften (Ward & Stanford 1995). Zum Schutz vor Hochwasser sowie zur Gewinnung zusätzlicher Landflächen wurden insbesondere im letzten und vorletzten Jahrhundert viele Flüsse in Mitteleuropa stark verbaut, das heißt begradigt und eingedämmt. Diese Schutzmaßnahmen führten zu den bestehenden naturfernen Flusslandschaften mit eingeschränkter Auenvegetation. Die Hochwasserereignisse der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass viele dieser Verbauungen den heutigen Sicherheitsanforderungen nicht mehr genügen. Dabei wurde klar, dass den Fließgewässern aus Gründen der Hochwassersicherheit wieder vermehrt Platz eingeräumt werden muss. Auch aus ökologischer Sicht sind Fließgewässer zu revitalisieren. Damit soll zumindest teilweise wieder eine naturnahe Fließwasserdynamik mit Wechselwirkungen zum Grundwasser hergestellt und die mit Dämmen vom Flusslauf getrennten Auenreste wieder an den Fluss angebunden werden. Die notwendigen wasserbaulichen Eingriffe für eine solche Fließgewässer-Revitalisierung, z. B. Aufweitung des Flussraums, Uferanrisse oder Unterlassung von Unterhaltsarbeiten, können bei flussnahen Trinkwasserfassungen zu Konflikten mit der Grundwassernutzung führen.

Gemäß der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) sind Grundwasserkörper dann weitergehend zu beschreiben, wenn Wechselwirkungen mit dem entsprechenden Fließgewässer festgestellt werden. Vor der Errichtung von Dämmen (z. B. für Hochwasserschutz) müssen die Auswirkungen dieses Eingriffs auf das Grundwasser geprüft werden. In der Schweiz regelt das Wasserbaugesetz, dass wasserbauliche Eingriffe zum Schutz vor Hochwasserschäden mit Flussraum-Aufwertungen einhergehen müssen, um wieder naturnähere Flusslandschaften zu ermöglichen (Woolsey et al. 2007). Gewässer und Ufer müssen so gestaltet werden, dass die Wechselwirkungen zwischen Fluss und Grundwasser weitgehend erhalten bleiben. Die schweizerische Auen-schutzverordnung fordert solche Aufwertungsmaßnahmen auch ohne Eingriffe zugunsten des Hochwasserschutzes.

Als Arbeitshypothese gehen wir davon aus, dass flussnahe Trinkwasserfassungen gegenüber einer Verunreinigung des Grundwassers gefährdet sind (Trüeb 1962, 1963, Sontheimer & Nissing 1977). Daraus folgt, dass die zuständigen Behörden den potenziellen Konflikt von Flussraum-Aufweitungen mit der Grundwassernutzung im flussnahen Bereich kennen und entsprechende Schutzmaßnahmen ergreifen müssen. Die praktischen Möglichkeiten zur Vermeidung bzw. Entschärfung eines solchen Konflikts wurden unseres Erachtens bisher noch zu wenig ausgeleuchtet. Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, das Risiko einer Beeinträchtigung flussnaher Fassungen zu beurteilen und technische

Maßnahmen zu ihrem Schutz vorzuschlagen. Dies ist umso besser möglich, je genauer die Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser (physikalische und biogeochemische Vorgänge an der Grenze Flusswasser/Grundwasser) vor und nach Flussraum-Aufweitungen bekannt sind.

## Grundlagen

Im Folgenden werden die bisherigen Kenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen Fließgewässern und dem Grundwasser gewürdigt und die dazu notwendigen Grundlagen dargelegt. In Schwemmebenen alpiner und voralpiner Einzugsgebiete (z. B. Münchner Schotterebene, Rheintal, Schweizerisches Mittelland) stehen Fließgewässer vielerorts im Austausch mit ungespanntem Grundwasser, mit Raten von bis zu  $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Hoehn 2002). Die Beziehungen zwischen Fließgewässer und Grundwasser sind räumlichen und zeitlichen Veränderungen unterworfen (Trüeb 1962, 1963, Brunke et al. 2003). Kiessandige Schotterablagerungen wirken als sehr gut durchlässige Grundwasserleiter ( $k_f$ -Werte von im Allgemeinen  $10^{-4}$ – $10^{-2} \text{ m s}^{-1}$ ), und die Sohlen der Fließgewässer sind im naturnahen Zustand mehrheitlich gut durchlässig. Falls der Grundwasserspiegel in Flussnähe höher liegt als der Flusswasserspiegel, besteht ein Gefälle zum Fluss, d. h. dieser wirkt als Vorfluter und das Grundwasser exfiltriert. Bei umgekehrtem Gefälle verliert der Fluss Wasser in den Untergrund und das Flusswasser infiltriert (z. B. Woessner 2000). Infiltration kann durch Pumpbetrieb in einer nahe am Ufer gelegenen Grundwasserfassung künstlich erzeugt oder verstärkt werden. Unter gewissen Bedingungen wird die Durchlässigkeit der Flusssohle durch die Bildung einer Kolmationsschicht reduziert, im Extremfall bis hin zur vollständigen Kolmation (z. B. Schälchli 1995). Kolmation vermindert bzw. unterbindet den Austausch von Wasser zwischen Fluss und Grundwasser. Bei Hochwasser kann die Kolmationsschicht wieder aufgerissen werden. Falls der Grundwasserspiegel über der Flusssohle oder, je nach Grad ihrer Kolmatierung, höchstens wenige Dezimeter darunter liegt, infiltriert der Fluss direkt ins wassergesättigte Sediment (z. B. Bouwer 1978, Hoehn et al. 1983). Der hydraulische Anschluss des Flusses an das Grundwasser unterbindet die Zufuhr von Bodenluft. Bei tiefer liegendem Grundwasserspiegel geht der hydraulische Anschluss verloren und es entsteht eine ungesättigte Zone zwischen dem durchlässigen Flussbett und dem Grundwasserspiegel. Bei einer solchermaßen indirekten Infiltration versickert Flusswasser durch eine ungesättigte und belüftete Zone hindurch ins Grundwasser. Die ungesättigte Zone weist häufig eine wesentlich geringere Durchlässigkeit auf als die gesättigte.

Bei Infiltrationsbedingungen besteht das Grundwasser aus einer Mischung von verschiedenen Typen: i) flussnahe

Infiltrat (hyporheischem Grundwasser), ii) älterem Infiltrat von weiter flussaufwärts, sowie iii) Grundwasser aus der Versickerung von Niederschlagswasser. Unter flussnahem Infiltrat verstehen wir Wasser, welches eine Aufenthaltszeit im Untergrund von  $< 10$  d bzw.  $< 50$  d aufweist, was dem Wert für die äußere Begrenzung der Zone 2/II in der Schweiz bzw. in Deutschland entspricht. Die drei Grundwassertypen treten im Grundwasserleiter oft geschichtet auf und sind chemisch unterschiedlich zusammengesetzt (Abb. 1; z. B. Hoehn et al. 2007). Zwischen dem Fluss und dem Auftreten an einer Messstelle weisen die verschiedenen Grundwassertypen unterschiedlich lange Verweilzeiten im Untergrund auf. Maßgeblich für die Trinkwasserqualität in einer Fassung ist die Verweildauer des Anteils an flussnahem Infiltrat und nicht jene des geförderten Mischgrundwassers. In alpenrandnahen Schotterebenen betragen die Verweilzeiten des flussnahen Infiltrats bis zur Trinkwasserfassung oft nur wenige Tage. Derart kurze Verweilzeiten können unter gewissen Bedingungen bestimmt werden, z. B. mittels

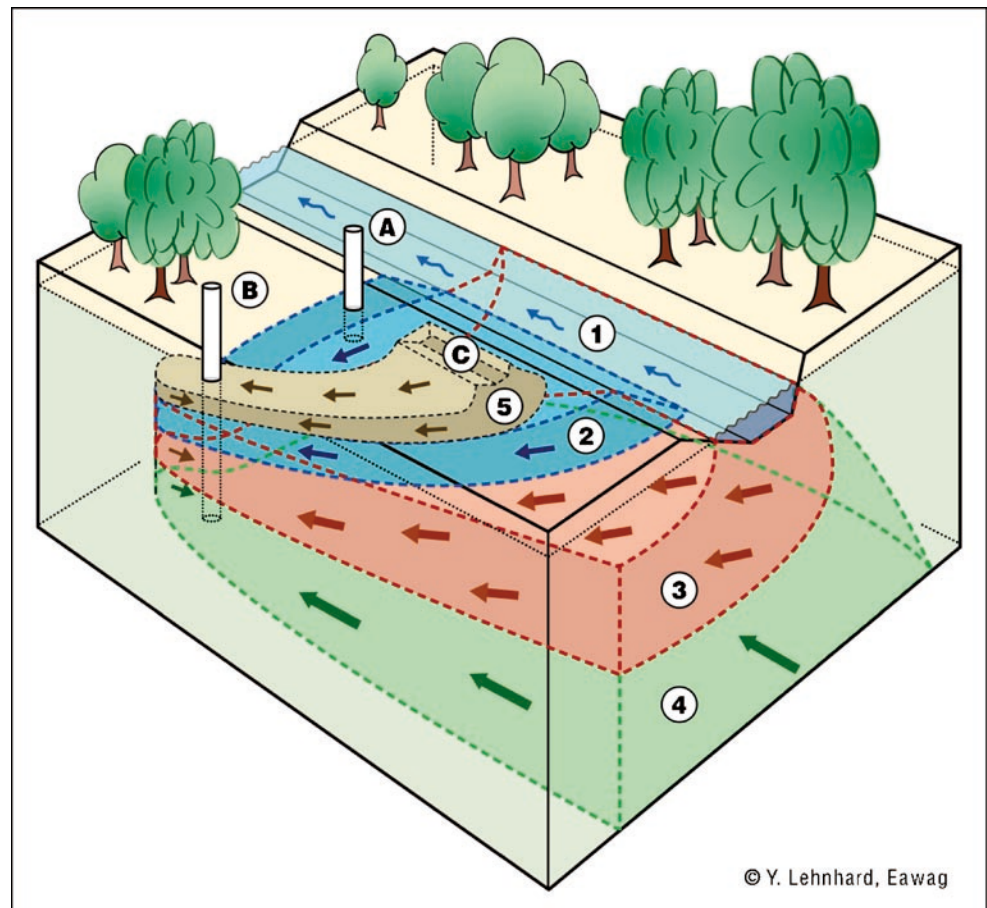
- ereignisgesteuerten Zeitreihenanalysen (bis max. 30 d; Cirpka et al. 2007, Vogt et al. 2009),
- Markierversuchen,

- Bestimmung des Radon-Wasseralters (bis max. 15 d; Hoehn & von Gunten 1989) und
- Bestimmung des  $^3\text{H}$ - $^3\text{He}$ -Wasseralters (ab 60 d; z. B. Beyerle et al. 1999).

Erstere führen zu kontinuierlichen Verteilungen der Aufenthaltszeiten, letztere ergeben ein Mischalter der Wasserprobe. Tabelle 1 zeigt Ereignisse, die zu einer Verminderung der Verweildauer bzw. zu einer Erhöhung des Anteils an flussnahem Infiltrat führen können.

Die Anteile der einzelnen Grundwassertypen im geförderten Mischgrundwasser können quantifiziert werden. Grundwasser aus versickerten Niederschlägen ist meist stärker mineralisiert und härter als flussnahes Infiltrat (z. B. Hoehn et al. 1983). Im voralpinen Raum ist die Isotopensignatur (z. B.  $\delta^{18}\text{O}$ ; Stichler et al. 1986) ein gutes Maß für die Abschätzung des Anteils an flussnahem Infiltrat. Viele Flüsse enthalten Anteile an (geklärten und ungeklärten) Abwässern. Dies verschlechtert die Qualität des Flusswassers und wirkt sich entsprechend auf die Qualität des Infiltrats aus (z. B. Bourg & Bertin 1994). In der dicht besiedelten Schweiz weist flussnahes Infiltrat Anzeichen einer Belastung mit persistenten organischen Verbindungen aus Abwässern auf (z. B. Hoehn et al. 1983). Älteres Infil-

**Abb. 1** Schematische Darstellung des Infiltrationsvorgangs, mit Grundwasserströmung zu einem flussnahen Brunnen: 1: Flusswasser; 2: flussnahes Infiltrat; 3: älteres, weiter stromaufwärts infiltriertes Grundwasser; 4: Grundwasser aus versickerten Niederschlägen, Hangwasser; 5: Wasser aus Anlage für künstliche Grundwasseranreicherung; A: stark gefährdeter unvollkommener Brunnen, mit flussnahem Infiltrat; B: gefährdeter vollkommener Brunnen, mit Mischgrundwasser; C: gelegen zwischen Fluss und Brunnen B (siehe auch Tab. 2) (verändert, aus Hoehn et al. 2007)



**Tabelle 1** Beispiele von Ereignissen in und an Fließgewässern und ihre Auswirkungen auf das in nahe gelegenen Fassungen mit Infiltratanteil geförderte Grundwasser

Ereignis	Auswirkung
1 Hochwasserwellen des Flusses	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dekolmation des Fließgewässerbetts</li> <li>• Erhöhung der spezifischen Infiltrationsrate (Schluckvermögen)</li> <li>• Erhöhung des Anteils an flussnahem Grundwasser im geförderten Grundwasser</li> <li>• Reduktion der Verweildauer des geförderten Mischgrundwassers</li> </ul>
2 Lange Trockenperioden	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kolmation des Fließgewässerbetts</li> <li>• Erniedrigung der spezifischen Infiltrationsrate (Schluckvermögen)</li> <li>• Erniedrigung des Anteils an flussnahem Grundwasser im geförderten Grundwasser</li> <li>• Erhöhung der Verweildauer des geförderten Mischgrundwassers</li> </ul>
3 Große Schwankungen des Grundwasserspiegels	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei indirekter Infiltration: Verkleinerung der Distanz zwischen Flusssohle und Grundwasserspiegel, bis hin zur Möglichkeit des Auftretens von direkter Infiltration</li> <li>• Wechsel zwischen Exfiltration und direkter Infiltration, was im unteren Teil von Schotterebenen auftritt</li> </ul>

trat hingegen ist in seiner Zusammensetzung oft nur noch schwach von Grundwasser aus versickerten Niederschlägen zu unterscheiden. Falls das Infiltrat einen Gehalt an organischem Kohlenstoff von deutlich über  $1 \mu\text{g/g}$  aufweist, kann die mikrobiell medierte Sauerstoffzehrung, v. a. bei sommerlichen Wassertemperaturen, bedeutend werden (von Gunten et al. 1991). Dies kann bei direkter Infiltration belasteter Flüsse in gewissen Fällen zur Eisenlösung führen. Bei Flussraum-Aufweitungen im Anströmbereich von Fassungen mit flussnahe Infiltratanteil nimmt die Gefährdung noch zu.

In den meisten Ländern Europas soll Grundwasser möglichst ohne Aufbereitung als Trinkwasser genutzt werden können. Das geförderte Rohwasser soll chemisch und mikrobiologisch so beschaffen sein, dass die gesetzlich festgelegten Trinkwasserwerte eingehalten werden. Zudem sollen Anlagen und Tätigkeiten das Grundwasser nicht beeinträchtigen. In vielen voralpinen und alpinen Schotterebenen befinden sich bedeutende Trinkwasserfassungen in der Nähe von Flussläufen, weil dort das Dargebot an Grundwasser in der Regel größer und beständiger ist als in größerer Distanz zum Fluss. Diese Fassungen fördern zu einem nennenswerten Anteil Flussinfiltrat. Für den Infiltratanteil solcher Fassungen reicht der Entnahmebereich bis ans Flussufer. Das geförderte Wasser weist wegen der Verdünnung durch das Infiltrat oft eine geringere Belastung durch Nitrat und Pflanzenschutzmittel auf als Grundwasser aus Niederschlägen.

Zudem ist es im Normalfall frei von pathogenen Bakterien, denn diese werden in sauberem Kies-Sand relativ rasch eliminiert (z. B. Kustermann 1962; coliforme Keime im Laborversuch:  $> 90\%$  innerhalb von 10 Tagen, siehe Merkli 1974; neuere Literatur zusammengefasst in Regli & Huggenberger 2007).

Inhaber von Trinkwasserfassungen sind verpflichtet, Wasserschutzgebiete einzurichten (Deutschland: Wasserhaushaltsgesetz, § 19; siehe DVGW 2006) bzw. Schutzzonen auszuweisen (Schweiz: Gewässerschutzgesetz, Art. 20; BUWAL 2004). Kritische Parameter für die Wasserqualität flussnaher Fassungen sind i) der Infiltratanteil, ii) die Verweilzeiten des Infiltrats und iii) die Qualität des Flusswassers. In Deutschland gilt die Uferfiltration vielerorts als erste von mehreren Aufbereitungsstufen für Trinkwasser (z. B. Sontheimer & Nissing 1977, Tufenkji et al. 2002). Idealerweise liegen Fassungen in Distanzen zum Fluss, die es erlauben, das Grundwasser ohne Aufbereitung zu nutzen. Innerhalb der Engeren Schutzzone (Zone II bzw. Zone S2) um eine Trinkwasserfassung herum muss das geförderte Grundwasser eine Verweildauer von mindestens 50 Tagen (DVGW 2006) bzw. 10 Tagen in der Schweiz (Gewässerschutzverordnung, siehe auch BUWAL 2004) aufweisen.

Fassungen mit Infiltratanteil sind generell schwieriger zu schützen als Fassungen mit Grundwasser aus Niederschlägen (Regli et al. 2003). Der Infiltratanteil muss auf der Strecke zur Fassung genügend gut gereinigt werden. Wenn dieser weitgehend Salze sowie gut abbaubare und sorbierende Stoffe aus geklärten Abwässern enthält, bestehen keine nennenswerten Probleme mit der Grundwassernutzung zu Trinkwasserzwecken. In industrialisierten Gebieten enthalten geklärte Abwässer jedoch zusätzlich Spuren von nicht abbaubaren, mobilen und, falls in höheren Konzentrationen vorliegend, teilweise toxischen Schadstoffen. Diese können mit dem Infiltrat bis zu den flussnahen Trinkwasserfassungen gelangen. Deshalb stellen wir im Folgenden ein Beurteilungssystem bezüglich des Risikos durch Flussraum-Aufweitungen zur Diskussion und schlagen Maßnahmen zur Minderung der Gefährdung vor.

### Methodischer Ansatz für die Beurteilung flussnaher Grundwasserfassungen

In den letzten Jahren wurden Fälle bekannt, bei denen Trinkwasserfassungen, welche Wasser mit nennenswertem Infiltrat-Anteil fördern, nach Flussraum-Aufweitungen Qualitätseinbußen erlitten. Die Verweildauer des geförderten Mischgrundwassers nahm ab und fiel unter die geforderten Werte. Zudem nahm der Anteil an flussnahe Infiltrat zu (SVGW 2007). Als methodischen Ansatz für die Beurteilung der Gefährdung flussnaher Grundwasserfassungen



durch Flussraum-Aufweitungen schlagen wir vor, folgende hydraulische Kriterien zu verwenden:

- i) Aufenthaltszeiten des flusssnahen Infiltrats,
- ii) dessen Mischungsanteil im geförderten Wasser und
- iii) das Vorhandensein oder Fehlen einer ungesättigten Zone zwischen Flusssohle und Grundwasserspiegel.

Gegenüber jenen von Regli & Huggenberger (2007) und des SVGW (2007) ist der vorliegende Ansatz insofern verschieden, als er weder von der Reinigungsleistung der Flusssohle noch von der stofflichen Belastung des Fließgewässers abhängt. Die Anwendbarkeit des hier zur Diskussion gestellten Ansatzes wird im Folgenden mit Fallbeispielen aus voralpinen Schotterebenen der Schweiz unterlegt.

Bei der Gefährdung der Trinkwasserversorgung als Folge von Flussraum-Aufweitungen unterscheiden wir drei Fälle:

- i) Generell geringes Risiko,
- ii) Risiko während oder nach durchgeführten Flussraum-Aufweitungen,
- iii) hohes Risiko bei problembehafteten Fassungen, unabhängig von geplanten Flussraum-Aufweitungen (Problemfälle).

Wenn die vorgängig beschriebenen Grundlagen quantifiziert vorliegen, kann das Risiko einer Beeinträchtigung der Fassung mit diesem methodischen Ansatz abgeschätzt werden.

#### Fälle mit geringem Risiko

Das Risiko einer Verunreinigung des Grundwassers in einer Fassung infolge Flussraum-Aufweitungen ist nicht vorhanden oder gering, falls im aufzuwertenden Flussabschnitt dauernd und ausnahmslos

- Beziehungen zwischen Fließgewässer und Grundwasser fehlen, d. h. das Flussbett verläuft natürlicherweise in gering wasserdurchlässigen Deckschichten, oder
- das Grundwasser ins Fließgewässer exfiltriert, d. h. die Fließrichtung des Grundwassers sowohl bei niedrigen Grundwasserspiegeln als auch bei Dauerförderung mit der konzessionierten Pumpleistung entweder in Richtung Fließgewässer oder zumindest talparallel verläuft (z. B. im Thurtal, siehe Vogt et al. 2009), oder
- der Entnahmebereich des Fließgewässers entweder unterhalb der geplanten Flussraum-Aufweitungen liegt oder stromaufwärts in einer Distanz, welche direkte Fließwege zur Fassung ausschließt.

Unter diesen Bedingungen ist die Sicherheit der Trinkwasserversorgung auch dann gewährleistet, wenn das Ufer des Fließgewässers nach einer Aufweitung näher bei der Fassung liegt. Eine Kolmation der Flusssohle über durchlässigem Gestein kann die Beziehungen zwischen Fluss und Grundwasser vermindern und im Extremfall ganz unterbinden. In diesem Fall strömt das Grundwasser unter dem Fluss hindurch, ohne mit flusssnahem Infiltrat angereichert zu werden.

Während Flussraum-Aufweitungen in der Nähe von Trinkwasserfassungen muss sichergestellt werden, dass solche dichtende Schichten nicht durchbrochen werden, weil sonst zwischen Fließgewässer und Grundwasser ein unerwünschter Austausch erzeugt werden kann. Wenn der Fluss auf künstlich abgedichtetem Bett verläuft, ist nach einer Uferaufweitung damit zu rechnen, dass er ins Grundwasser infiltriert.

Aufweitungen in der Nähe von Fassungen dürfen das Fließgewässer nicht aufstauen, damit der Infiltratanteil in der Fassung nicht zunimmt. Auch darf das Grundwasser nicht abgesenkt werden, z. B. mittels Entwässerungskanälen. Als Beweismittel und Wirksamkeitskontrolle sind während einer Zeit von minimal einem Jahr vor und während der Flussraum-Aufweitung folgende Parameter in angepasster Frequenz zu überwachen und ihre Werte mittels Analysen von Zeitreihen auszuwerten (BUWAL 2004):

- Abstand zwischen Flusssohle und Grundwasserspiegel,
- Verweildauer im Untergrund bzw. Alter des geförderten Grundwassers,
- Mischanteile des geförderten Grundwassers,
- Chemischer und mikrobiologischer Zustand des Fließgewässers und des geförderten Grundwassers.

Zudem sollen Extremsituationen (z. B. Hochwasserspitzen) ereignisorientiert überwacht werden. Der Aufstau von Flüssen bei Laufkraftwerken hat gezeigt, dass es bis zum Aufbau einer stabilen Kolmationsschicht an der Flusssohle Jahre dauern kann (z. B. Limmat, Wettingen: Harder 1935, 1938). Mangels genügend langer Erfahrungen über Veränderungen in der Grundwasserqualität als Folge von Flussraum-Aufweitungen sollte deshalb die Überwachung nach dem Eingriff unseres Erachtens minimal drei Jahre weitergeführt werden.

#### Fälle mit Risiko während oder nach durchgeführten Flussraum-Aufweitungen

Insbesondere bei Fließgewässern, welche ins Grundwasser infiltrieren, ist bei einer Flussraum-Aufweitung mit erheblichen Auswirkungen auf das Grundwasser und daher mit dem Risiko einer Verunreinigung von Trinkwasserfassungen zu rechnen. Die WRRL interpretiert ihre Ziele vorab in ökotoxikologischer und strukturmorphologischer Hinsicht. Bei der Umsetzung der im Entwurf vorliegenden Tochterrichtlinie über Grundwasser wurden die Anliegen der Fachleute für eine einwandfreie Versorgung mit Trinkwasser nur ungenügend berücksichtigt (EU 2006). Dies kann sich insbesondere für flussnahe Fassungen nachteilig auswirken. Die derzeit geforderten Werte berücksichtigen nicht, dass trinkwasserrelevante Stoffe, die sich in der Umwelt als schlecht abbaubar erweisen, den natürlichen Wasserkreislauf nicht belasten sollten (Wirtz 2006). In Deutschland regelt das Arbeitsblatt W 101 (DVGW 2006) den Fall von

Uferfiltrat und Seihwasser in Kapitel 4.5.4, in dem Sinn, dass geprüft werden muss, ob zumindest Teile des infiltrierenden oberirdischen Gewässers und seines Einzugsgebiets ins Trinkwasserschutzgebiet einbezogen werden sollen. Andernfalls wäre die Reinhaltung dieses Gebiets durch andere Maßnahmen zu gewährleisten. Für flussnahe Fassungen, welche einen erheblichen Anteil Infiltrat fördern, sind oberirdische Gewässer, die mit Abwasser belastet sind, problematisch. In der Schweiz sind wasserbauliche Maßnahmen für die Fließgewässer-Revitalisierung nur außerhalb der Engeren Schutzzone erlaubt und in der Weiteren Schutzzone S3 bewilligungspflichtig (BUWAL 2004). Bei Fassungen mit einem geringen Anteil an flussnahem Infiltrat dürften kurzfristige Überschreitungen von gesetzlich geforderten Werten von Schadstoffen im Fluss durch Misch-, Verzögerungs- und evtl. Abbauvorgänge in den meisten Fällen genügend stark gedämpft werden, um die Anforderungen an Trinkwasser zu erfüllen.

Für die Beurteilung des Risikos von Flussraum-Aufweitungen im Einflussbereich flussnaher Trinkwasserfassungen ist zu unterscheiden zwischen Flüssen, die indirekt über eine ungesättigte Zone ins Grundwasser infiltrieren, und solchen mit direktem Anschluss ans Grundwasser (Regli & Huggenberger 2007). Bei einer dauernd indirekten Infiltration ist das Risiko einer Verunreinigung der Trinkwasserfassung eher gering. Ebenso bleibt bei einer geringen Durchlässigkeit der ungesättigten Zone der Anteil an flussnahem Infiltrat eher tief und das Risiko der Beeinträchtigung einer flussnahen Fassung eher klein. Im Folgenden stellen wir für den Fall von indirekter Flussinfiltration in alpinen und voralpinen Schottergebieten Bedingungen zur Diskussion, die aus Sicht der Wasserversorgung idealerweise erfüllt sein sollten, und zwar sowohl bei der Planung von Flussraum-Aufweitungen als auch nach den ausgeführten Arbeiten. Unser Vorschlag knüpft an die Erfahrungen bei der Modellierung der Auswirkungen geplanter Flussraum-Aufweitungen im oberen Bereich des Thurtals an (Bürglen-Weinfeld: Baumann 2009; Schachen-Weinfeld: Vogt et al. 2009). Dort werden zwar deutliche Erhöhungen des Grundwasserspiegels erwartet, die aber nicht zu wesentlich kürzeren Aufenthaltszeiten zu Fassungen führen dürften.

- i) Die Fassung muss sich in einer Distanz vom Ufer weg befinden, die derart groß ist, dass das flussnahe Infiltrat im gesättigten Bereich des Grundwasserleiters die geforderte Verweildauer von mindestens 10 bzw. 50 Tagen aufweist (Engere Schutzzone). Neben der Selbstreinigung gegenüber pathogenen Mikroorganismen, gewährleistet die geforderte minimale Verweildauer auch eine ausreichende Vorwarnzeit bei unfallbedingten Verunreinigungen des Flusswassers.
- ii) Im ungesättigten Bereich des Grundwasserleiters mit kiessandigem Material zwischen Flusssohle und Grundwasserspiegel sollte sich eine Zone mit einer Mäch-

tigkeit von mindestens 10 m über dem natürlichen, zehnjährigen Grundwasserhöchstspiegel befinden. In vorsichtiger Interpretation des Gesetzes von Darcy wird angenommen, dass eine spezifische Infiltrationsrate,  $q$ , von  $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , eine nutzbare Porosität für Wasser im ungesättigten Bereich (volumetrischer Wassergehalt),  $p$ , von 10 %, und eine Potenzialdifferenz,  $x$ , von 10 m zwischen Flusssohle und Grundwasserspiegel zu einer Verweildauer,  $t$ , von  $t = x \cdot p/q = 10 \text{ d}$  führt.

- iii) Der Anteil an flussnahem Infiltrat sollte 10 % nicht übersteigen. Damit werden kurzfristige hohe Belastungen von Schad- oder Fremdstoffen im Flusswasser durch Mischungs-, Verzögerungs- und evtl. Abbauvorgänge in der Regel genügend stark gedämpft, sodass die Trinkwassergewinnung nicht gefährdet wird. Unser Vorschlag befindet sich bewusst auf der vorsichtigen Seite: Die Erfahrungen im Thurtal zeigten, dass Mischungsrechnungen über die Endglieder Flusswasser und Grundwasser aus Niederschlägen, z. B. mittels Alkalinität oder Chlorid, bei geringen Konzentrationsunterschieden nur wenig genau sind (Hoehn et al. 2007).

Falls alle drei Bedingungen ( $> 10 \text{ m}$  mächtige ungesättigte Zone bzw. 10 d Verweilzeit des Sickerwassers in der ungesättigten Zone, minimal für die Engere Schutzzone geforderte Verweildauer des Grundwassers im gesättigten Grundwasserleiter und  $< 10 \%$  Anteil an flussnahem Infiltrat) erfüllt sind, besteht unseres Erachtens aus Sicht der Wasserversorgung ein gewisser Spielraum für Flussraum-Aufweitungen.

Im kritischeren Fall einer zumindest zeitweiligen direkten Infiltration in den gesättigten Grundwasserleiter besteht höchstens dann ein gewisser Spielraum für Flussraum-Aufweitungen, wenn gezeigt werden kann, dass die Verweilzeiten im heutigen Zustand deutlich über den geforderten minimalen Werten liegen und der Anteil an flussnahem Infiltrat unter dem vorgeschlagenen Wert von 10 % liegt. Das dürfte vor allem in alpinen und voralpinen Schotterebenen nur selten der Fall sein.

Bei solchermaßen gefährdeten Trinkwasserfassungen müssten unseres Erachtens die weiter oben erwähnten Überwachungsmaßnahmen auf eine Zeit von minimal 2 Jahren vor, während, und minimal sechs Jahren nach den Aufweitungen – bzw. bis sich die Flusssohle stabilisiert hat – ausgedehnt werden. Gegenüber den Fällen mit geringem Risiko werden hier die Überwachungsmaßnahmen verschärft. Mit dieser Verschärfung beziehen wir uns auf Fälle von Verschlechterungen der Grundwasserqualität als Folge von Flussraum-Aufweitungen. Das Aufbrechen der bestehenden Uferverbauungen im Fluss Wiese bei Basel („Lange Erlen“) führte in einer Fassung der Industriellen Werke Basel in einer Distanz vom revitalisierten Ufer von ca. 140 m zu einer ursächlichen Verringerung der Aufenthaltszeit um etwa einen Faktor von 2 und einer regelmäßigen Verkeimung. Diese Fassung wurde sicherheitshalber vom Netz entfernt (Hug-

genberger 2001, SVGW 2007). In einer Auenlandschaft der Aare zwischen Bern und Thun wurde ein Grundwasserwerk und – während des Baus der Fassung – als Revitalisierung ein Infiltrationsgraben sowie Teiche und Feuchtgebiete als „Seitenarm“ der Aare erstellt. Dies führte zu einem Durchbruch von Kleinlebewesen und sporadisch auftretenden bakteriologischen Verunreinigungen. Erst als sowohl der Graben als auch der Seitenarm wieder geschlossen wurden, entsprach die Qualität des geförderten Wassers den gesetzlichen hygienischen Bestimmungen (SVGW 2007).

Bereits bei der Planung von Flussraum-Aufweitungen sind Maßnahmen zum Schutz flussnaher Grundwasserfassungen vor Verunreinigung vorzusehen, z. B.:

- Bezeichnung einer Distanz vom heutigen Ufer aus für die größte zugelassene Aufweitung des Flussraums. Dies ergibt Zeit für Planung und Durchführung von Gegenmaßnahmen, für den Fall, dass der Fluss sich nach einer Aufweitung weiter in seitlicher Richtung ausdehnen sollte (Baumann 2003).
- Verstärktes Aufteilen der vorgesehenen Eingriffe in Etappen, z. B. auf einzelne kleinere Flussabschnitte (Oplatka 1999). Dies erlaubt, Folgen abzuschätzen und allenfalls Gegenmaßnahmen einzuleiten.
- Erarbeitung von Alternativlösungen mit weniger starken Auswirkungen auf das Grundwasser in der Nähe von Trinkwasserfassungen (Baumann et al. 2009, Baumann 2003). Dies wird nötig, falls eine Modellierung der Infiltrationsverhältnisse unerwünscht starke Auswirkungen vorhersagt (z. B. Anstieg der Grundwasserspiegel).

Mögliche Hochwasserwellen des Flusses und große Schwankungen des Grundwasserspiegels können bewirken, dass eine oder mehrere der oben beschriebenen Bedingungen nicht erfüllt sind, und daher der notwendige Schutz der Wasserversorgung nicht gewährleistet werden kann (Tab. 1). In solchen Fällen ist grundsätzlich auf wasserbauliche Eingriffe zu verzichten, die über die unbedingt erforderlichen Hochwasserschutz-Maßnahmen hinausgehen. Die zuständigen Behörden sollten Bewilligungen für solche Maßnahmen nur nach besonders sorgfältiger Prüfung und mit vorsorglichen Schutzmaßnahmen für die Trinkwasserfassungen erteilen. Innerhalb der Engeren Schutzzone sind Flussraum-Aufweitungen nur dann zulässig, wenn eine Gefahr für die Trinkwassernutzung ausgeschlossen werden kann und sie bei Hochwassergefahr zur Rettung von Menschenleben oder erheblichen Sachwerten unerlässlich sowie standortgebunden sind. Wo auf Aufweitungen innerhalb

**Tabelle 2** Beispiele technischer Maßnahmen an problembehafteten Grundwasserfassungen mit Infiltratanteil und ihrer Umgebung zur Minderung des Risikos einer Grundwasser-Verunreinigung

Maßnahme	Auswirkung
1 Generelle Drosselung der Grundwasserförderung	Bei einer Drosselung der Grundwasserförderung wird der Absenkttrichter rund um die Fassung herum kleiner. Damit erhöht sich die Verweildauer, und der relative Anteil an flussnahe Infiltrat verringert sich. Eine Drosselung kann z. B. über eine Verringerung der konzessionierten Wassermenge erreicht werden.
2 Abhängigkeit der Grundwasserförderung vom Abfluss des Fließgewässers	Mit dem zeitweiligen Ausschalten der Fassung oder zumindest starken Drosselung der Förderleistung bei und unmittelbar nach Hochwasserwellen in Fließgewässern kann der hochwasserbedingten Verringerung der Verweilzeiten und Erhöhung des Infiltratanteils (Gefälle, Schluckvermögen) entgegengewirkt werden. Das Pumpregime kann in der Grundwasserfassung wasserstands- oder abflussabhängig gesteuert werden.
3 Einzug von Vollrohren im oberen Bereich des Filterbrunnens	Falls sich das flussnahe Infiltrat oben im Grundwasserleiter einschichtet, könnte der Anteil an flussnahe Infiltrat im geförderten Grundwasser vermindert werden, wenn nur noch aus größeren Tiefen gepumpt wird.
4 Künstliche Abdichtung von Uferzonen des Fließgewässers	Durch künstliche Abdichtung der Uferzonen kann die Infiltration von Oberflächenwasser in das Grundwasser unterbunden werden. Dazu müssen Abdichtungen bis an die Basis des wasserdurchlässigen Kiessands abgeteuft werden, weil sonst das flussnahe Infiltrat den Abdichtungskörper unter- bzw. umströmt. Bei kleinen Fließgewässern mit ungenügender Wasserqualität können die Sohlen abgedichtet werden. Spundwände sind im Kiessand richtungsstabil und genügend gut abdichtend; Schlitzwände sollten nur mit Bentonit als Dichtungsmasse ausgeführt werden, d. h. ohne organische Zusatzstoffe. Beispiele von Abdichtungen beim Aufstau von Flüssen zeigen, dass diese Maßnahme über viele Jahre hindurch wirksam ist (z. B. Rheinaufstau Kraftwerk Säkingen, Aareaufstau Kraftwerk Wildeg-Brugg; Jäckli & Kempf 1972). Nachteil vor allem von Dichtwänden ist, dass es sich um irreversible Eingriffe in den Grundwasserleiter handelt. Abdichtungen sind massive bauliche Eingriffe in den Untergrund, deren Durchführung spezieller Rechtfertigung bedarf.
5 Vorsorgliche Wasseraufbereitung	Der vorsorgliche Einbau einer Wasseraufbereitung ist eine anerkannte Maßnahme. Das Signal für das Zuschalten der Aufbereitung kann z. B. über die Abflussmenge des infiltrierenden Fließgewässers, der Lage des Grundwasserspiegels oder über die Trübung gesteuert werden.
6 Künstliche Anreicherung des Grundwassers	Wenn das in der Fassung geförderte Mischwasser infolge zu hohen Anteils an flussnahe Infiltrat eine zu kurze Verweildauer aufweist, kann die Möglichkeit erwogen werden, eine Anlage zur künstlichen Anreicherung des Grundwassers zu erstellen. Diese darf (anders als im Vorschlag von Regli et al. 2003) aber nicht zwischen Fließgewässer und Pumpwerk gebaut werden, weil so das Mischalter infolge der sehr geringen Verweildauer des Anreicherungswassers noch kleiner wird (Abb. 1). Wasser müsste landseitig in größerer Distanz von der Fassung weg zur Versickerung gebracht werden. Im Extremfall kann damit die Fließrichtung des Grundwassers so verändert werden, dass kein flussnahe Infiltrat mehr aus dem Fließgewässer in die Fassung gelangt.

der Engeren Schutzzone nicht verzichtet werden kann, sind Schutzmaßnahmen für das Grundwasser vorzusehen (Regli et al. 2003, Regli & Huggenberger 2007). Erst wenn diese Möglichkeiten nicht realisiert werden können, wäre eine Verlegung der Fassung bzw. die Beschaffung von Ersatzwasser zu prüfen.

Im Fall der Vorbereitungen für die geplanten Flussraum-Aufweitungen im Rahmen der 3. Thurkorrektur wurden gefährdete Trinkwasserfassungen untersucht. Der in Cirpka et al. (2007) und Hoehn et al. (2007) beschriebene Fall der Fassung Widen, Frauenfeld, ist beispielhaft: Minimale Aufenthaltszeiten bei und nach Hochwasserwellen von knapp 10 Tagen ließen es angebracht erscheinen, in diesem Flussabschnitt auf Aufweitungen zu verzichten.

Als Folge der erwähnten Erfahrungen müssen den Wasserversorgern technische Maßnahmen zur Minderung des Risikos einer Beeinträchtigung von Fassungen mit hohem Anteil an flussnahe Infiltrat aufgezeigt werden können. Solche Maßnahmen schlagen wir in Tabelle 2 vor. Deren Auswirkungen auf die Verweildauer des Grundwassers und den Infiltratanteil müssen vorgängig mit einem mit Felddaten gespeisten instationären Strömungsmodell simuliert und vorhergesagt werden. Mit den Maßnahmen aus Tabelle 2 können unter gewissen Umständen unerwünschte Strömungssituationen verbessert werden. Die Tabelle soll aber nicht den Eindruck einer übermäßigen Machbarkeit erwecken. Jede Fassung ist ein Einzelfall, der mit den geometrischen, geologischen und hydrologischen Parameterwerten beurteilt werden muss.

### Problembehaftete Fassungen

Problembehaftete Fassungen weisen auch ohne Flussraum-Aufweitungen zumindest zeitweise zu geringe Verweilzeiten bis zur Entnahme im Pumpwerk ( $< 10$  bzw.  $< 50$  d; Engere Schutzzone reicht bis ans Ufer) und/oder zu hohe Infiltratanteile verunreinigter Flüsse ( $> 10\%$ ) auf. Dieser Fall ist vielerorts mit einem direkten hydraulischen Anschluss des Grundwassers ans Fließgewässer verbunden. Bei schlechter Fließgewässerqualität, z. B. bei Stoßbelastungen durch ungenügend geklärte Abwässer oder Regenentlastungen, erhöht sich das Risiko einer Grundwasserverunreinigung deutlich. In diesen Fällen sollte auf den Zeitpunkt des Ablaufs der Konzession zur Entnahme von Grundwasser zu Trinkwasserzwecken ein Fassungsstandort an weniger exponierter Lage gefunden oder Ersatzwasser beschafft werden. Ersteres ist in dicht besiedelten Gebieten schwierig zu realisieren, wo neben den Fließgewässern viele andere raumwirksame Nutzungen mit dem Grundwasserschutz kollidieren. Das Risiko der Verunreinigung einer Grundwasserfassung mit (zu) hohem Infiltratanteil sollte bis zum Ablauf der Konzession mit planerischen und technischen Maßnahmen reduziert werden können.

### Ausblick

Zusammenfassend beurteilen wir Trinkwasserfassungen mit flussnahe Infiltratanteil nach ihrem Verunreinigungsrisiko bei Flussraum-Aufweitungen. Wir beschränken uns dabei auf hydraulische Beurteilungsgrößen und vermeiden einen Ansatz mit Berücksichtigung der stoffspezifischen Gefährdung. Damit glauben wir, einen Beitrag zur besseren Identifizierung solchermaßen gefährdeter Fassungen zu leisten.

Aufweitungen des Fließgewässerraums für den Schutz gegen Hochwasser bzw. zur Aufwertung des Gewässers geraten unter Umständen in einen Konflikt mit dem Grundwasserschutz, was Planer und Vollzugsbehörden vor große Herausforderungen stellt. Um eine Grundwasserfassung vor zu hohen Anteilen an flussnahe Infiltrat und zu geringer Verweildauer zu schützen, müssen die Fließwege und die Fließdynamik im Entnahmebereich einer Fassung vor Beginn der Arbeiten gut bekannt sein. Die zahlenmäßige Bestimmung von Verweilzeiten und Infiltratanteil setzt gute Kenntnisse der Durchlässigkeit und der Grundwasserströmung (Fließrichtung und -geschwindigkeit) bei Niedrig-, Mittel- und Hochwasser voraus. Die hydrogeologische Erkundung einer Fassung mit einem nennenswerten Anteil an flussnahe Infiltrat umfasst gegenüber einer solchen für Grundwasserfassungen in einem rundum ausgedehnten Grundwasserleiter ein Mehrfaches an Aufwand. Erst bei genauer Kenntnis der Mischungs- und Strömungssituation kann abgeschätzt werden, ob eine schutzbedürftige Grundwasserfassung auch nach Flussraum-Aufweitungen noch ordnungsgemäß geschützt werden kann.

Verweilzeiten und Mischanteile von Grundwasser als Größen für eine Beurteilung von Flussinfiltration dürften sich sinngemäß auch bei der künstlichen Anreicherung von Grundwasser verwenden lassen. Erwünscht sind auch dort belastbare Zahlenwerte, und diese sind mit der Qualität des eingespeisten Rohwassers und dem vorgesehenen Aufwand für die Aufbereitung des geförderten Wassers zu verknüpfen.

**Danksagung** Wir profitierten von Ergebnissen der Arbeitsgruppe „Fluss-Grundwasser-Interaktion“ der Schweizerischen Gesellschaft für Hydrogeologie (Leitung: P. Huggenberger). Wir danken den Herren Daniel Hartmann und Reto Mural, beide Sektion Grundwasserschutz, Bundesamt für Umwelt (BAFU), für die Durchsicht des Manuskripts.

### Literatur

- Baumann, M., Hoehn, E., Jordan, P.: Die 2. Thurgauer Thurkorrektur erfordert einen neuen Blick auf das Thurtaler Grundwasser.- Mitt. Thurgauer natf. Ges. **63** (2009), im Druck
- Baumann, M.: Hochwasserschutz, Flussraumaufwertung und Grundwasserschutz im Thurtal – Vorgehen zur Lösung von Konflikten.- Bull. angew. Geol. **8**(2), 47–55 (2003)
- Beyerle, U., Aeschbach-Hertig, W., Hofer, M., Imboden, D.M., Baur, H., Kipfer, R.: Infiltration of river water to a shallow aquifer



- fer investigated with  $^3\text{H}/^3\text{He}$ , noble gases and CFCs.- *J. Hydrol.* **220**, 169–185 (1999)
- Bourg, A. C. M., Bertin, C.: Seasonal and spatial trends in manganese solubility in an alluvial aquifer.- *Environ. Sci. Technol.* **28**(5), 868–876 (1994)
- Bouwer, H.: *Groundwater hydrology*.- 480 S.; McGraw-Hill Book Comp, New York, N.Y., U.S.A. (1978)
- Brunke, M., Hoehn, E., Gonser, T.: Patchiness of river-groundwater interactions within two floodplain landscapes and diversity of aquatic invertebrate communities.- *Ecosystems* **6**(8), 707–722 (2003)
- BUWAL: *Wegleitung Grundwasserschutz, Vollzug Umwelt*; Bundesamt für Umwelt, Bern (2004)
- Cirpka, O. A., Fienen, M. N., Hofer, M., Hoehn, E., Tessarini, A., Kipfer, R., Kitanidis, P. K.: Analyzing bank filtration by deconvoluting time series of electric conductivity.- *Ground Water* **45**(3), 318–328 (2007)
- DVGW: *Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete; Technische Regel Teil 1: Schutzgebiete für Grundwasser*, Arbeitsblatt W101 Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V., Bonn (2006)
- EU: *Richtlinie 2006/118/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung (Tochterrichtlinie)*, Amtsblatt der Europäischen Union L 372/19, 27. 12. 2006 (2006)
- Harder, W.: Über Erscheinungen und Veränderungen des Grundwassers in der Zone Wettingen – Baden, nach dem Aufstau der Limmat.- *Wasser- und Energiewirtschaft.* **35**(11), 135–142 bzw. **38**(2/3), 11–17 (1935 bzw. 1938)
- Hoehn, E.: Hydrogeological issues of riverbank filtration – A review.- In: Ray, S. (Hrsg.): *Riverbank filtration: Understanding contaminant biogeochemistry and pathogen removal*; NATO, Proc. NATO-ARW Workshop, Tihany, Hungary, 5–8 Sept. 2001; Kluwer Acad. Publ., 17–42 (2002)
- Hoehn, E., Zobrist, J., Schwarzenbach, R. P.: Infiltration von Flusswasser ins Grundwasser – Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Glattal.- *Gas-Wasser-Abwasser* **63**(8), 401–410 (1983)
- Hoehn, E., von Gunten, H. R.: Radon in groundwater – a tool to assess infiltration from surface waters to aquifers.- *Water Resour. Res.* **25**(8), 1795–1803 (1989)
- Hoehn, E., Cirpka, O. A., Hofer, M., Zobrist, J., Kipfer, R., Baumann, M., Scholtis, A., Favero, R.: Untersuchungsmethoden der Flussinfiltration.- *Gas-Wasser-Abwasser* **87**(7), 497–505 (2007)
- Huggenberger, P.: Wiese-Revitalisierung: Führen die Veränderungen der Sohlenstruktur zu einer Trinkwassergefährdung?- *Regio Basiliensis* **42**(1), 63–76 (2001)
- Jäckli, H.: Grundwasser und Oberflächengewässer in ihren gegenseitigen Beziehungen.- *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver.* **nF56**, 125–143 (1974)
- Kustermann, H.: Der Einfluss der Organismen in Kiesschotterböden der Flüsse auf die Wasserversorgung.- *Monatsbull. SVGW* **42**(2), 25–31; **42**(3), 54–63; **42**(4), 83–93 (1962)
- Merkli, B.: *Untersuchungen über Mechanismen und Kinetik der Elimination von Bakterien und Viren im Grundwasser*.- Diss. ETH Nr. 5420 (1974)
- Oplatka, M.: Die teilweise befreite Töss gestaltet ihr Flussbett.- *Gas-Wasser-Abwasser* **79**(11), 960–963 (1999)
- Regli, Ch., Guldenfels, L., Huggenberger, P.: Revitalisierung von Fließgewässern im Konflikt mit der Grundwassernutzung.- *Gas-Wasser-Abwasser* **83**(4), 261–272 (2003)
- Regli, Ch., Huggenberger, P.: Grundwasserschutz bei wasserbaulichen Eingriffen in Fließgewässer.- *Gas Wasser Abwasser* **87**(7), 521–528 (2007)
- Schälchli, U.: Basic equations for siltation of riverbeds.- *J. Hydraul. Eng.* **121**(3), 274–287 (1995)
- Sontheimer, H., Nissing, W.: Änderung der Wasserbeschaffenheit bei der Bodenpassage unter besonderer Berücksichtigung der Uferfiltration am Niederrhein.- *Gas-Wasser-Abwasser* **57**(9), 639–645 (1977)
- Stichler, W., Maloszewski, P., Moser, H.: Modelling of river water infiltration using oxygen-18 data.- *J. Hydrol.* **83**, 355–365 (1986)
- SVGW: *Empfehlungen, Revitalisierung im Einflussbereich von Trinkwasserfasungen, Regelwerk SVGW, W1004d, Mai 2007* (2007)
- Trüeb, E. U.: Erkundung und Bewirtschaftung von Grundwasservorkommen.- *Monatsbull. SVGW* **42**(12), 289–295; **43**(1), 9–16; **43**(2), 27–34 (1962/1963)
- Tufenkji, N., Ryan, J. N., Elimelech, M.: Bank filtration, a simple technology may inexpensively clean up poor-quality raw surface water.- *Environ. Sci. Technol.* **36**(21), 423A–428A (2002)
- Vogt, T., Hoehn, E., Schneider, Ph., Cirpka, O. A.: Untersuchung der Flusswasserinfiltration in voralpinen Schottern mittels Zeitreihenanalyse.- *Grundwasser* **14**, DOI: 10.1007/s00767-009-0108-y (2009)
- Von Gunten, H. R., Karametaxas, G., Krähenbühl, U., Kuslys, M., Giovanoli, R., Hoehn, E., Keil, R.: Seasonal biogeochemical cycles in riverborne groundwater.- *Geochim. Cosmochim. Acta* **55**(12), 3597–3609 (1991)
- Ward, J. V., Stanford, J. A.: Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation.- *Regulated Rivers Res. & Manag.* **11**, 105–119 (1995)
- Wirtz, F. J.: Anforderungen der Wasserwerke an die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie.- *gwf-wasser-abwasser* **147**(4), 319–321 (2006)
- Wyssling, L.: *Unterhalt und Entwicklungskonzept Töss im Leisental, Grundwasser-Überwachung, 7. Zwischenbericht mit 5 Beilagen, Nr. 2004.1093, zuhanden des Amts für Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich; Geologisches Büro Dr. L. Wyssling AG, vom 31. März 2004* (2004)
- Woessner, W. W.: Stream and fluvial plain ground water interactions: rescaling hydrogeological thought.- *Ground Water* **38**(3), 423–429 (2000)
- Woolsey, S., Capelli, F., Gonser, T., Hoehn, E., Hostmann, M., Junker, B., Paetzold, A., Roulier, Ch., Schweizer, St., Tiegs, S. D., Tockner, K., Weber, Ch., Peter, A.: A strategy to assess river restoration success.- *Freshwater Biol.* **52**, 752–769 (2007)